

## Bi-2223 테이프의 사고전류 특성

### Fault Current Characteristics of a Bi-2223 Tape

류경우\*, 최병주\*\*, 차귀수\*\*\*

Kyung Woo Ryu\*, Byoung Ju Choi\*\* and Guee Soo Cha\*\*\*

**Abstract** : A Bi-2223 tape has been developed for low-field power applications such as power cables or transformers working at liquid nitrogen temperature. For such applications it is required to understand fault current characteristics of the Bi-2223 tape.

In this paper, we report fault current characteristics using two types of samples, straight sample and pancake coil sample. It was found that the fault current characteristics of the Bi-2223 tape are independent of external fields and frequencies. However they depend on electrical insulations and fault durations strongly. Also it was shown that the fault current characteristics in the insulated straight sample are similar to those in the pancake sample with a conductor insulation. Finally, it was shown that the pancake sample with a layer insulation has better characteristics than that with a conductor insulation for fault currents.

**Key Words** : Bi-2223 tape, fault current characteristics, electrical insulation, fault duration.

### 1. 서 론

Bi-2223 테이프는 현 단계에서도 장 선재로의 가공이 가능할 뿐만 아니라, 높은 임계 온도(약 110 K) 특성으로 액체질소에서 운전이 가능하여 냉각효율이 우수(액체헬륨의 50배정도)하고, 특히 낮은 자장에서 임계전류밀도가 높아 전력케이블 및 변압기 등에 상용화가 기대되고 있다. 한편, 이 전력응용장치들은 항상 전력계통과 연계하여 정상상태에서는 정격전류로 운전되지만, 사고 시에는 수십 배에 이르는 대단히 큰 과도전류가 흐르게 된다. 이와 같은 큰 사고전류에 대하여 Bi-2223 테이프는 단선으로부터 안전하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 비교적 낮은 자장 하에서 운전되는 전력케이블 및 변압기에의 상용화를 위하여 이 전력응용장치들의 구조를 모의하여 Bi-2223 테이프를 사용한 직선형 샘플과 팬케이크형 샘플을 제작하였

으며, 각각의 샘플에 대한 임계전류, 주파수, 전기절연 방식, 사고 지속시간 및 모재 등이 사고전류 특성에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다.

### 2. 샘플 및 실험 방법

#### 2.1 직선형 및 팬케이크형 샘플

기계적 특성이 비교적 나쁜 Ag 모재와 특성이 우수한 AgMgNi 합금 모재로 구성된 Bi-2223 테이프의 주요 사양을 표 1에, 그리고 Bi-2223 테이프의 대표적인 모재로서 사용되고 있는 Ag 및 합금에 대한 저항률 - 온도 특성을 그림 1에 각각 나타내었다[1]. 그림 1로부터, 모재의 저항률은 보통금속의 저항특성처럼 온도가 증가함에 따라 커지며, 순수 Ag 모재의 경우가 합금 모재보다 저항률의 온도 의존성이 더 크다는 것을 알 수 있다.

표 1. Bi-2223 테이프의 사양.

Table 1. Specifications of the Bi-2223 tape.

| 모 재    | 사이즈(mm <sup>2</sup> ) | Bi-2223/모재 (%) | 필라멘트 구조 |
|--------|-----------------------|----------------|---------|
| Ag     | 3.5×0.3               | 23/77          | 다심      |
| AgMgNi | 3.5×0.3               | 25/75          | 다심      |

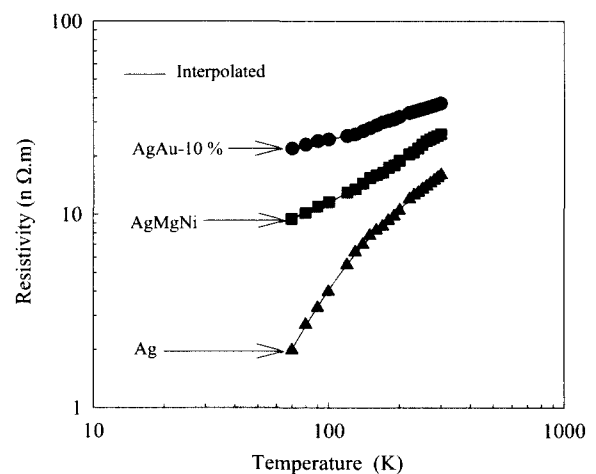


그림 1. 모재의 저항률 - 온도 특성.

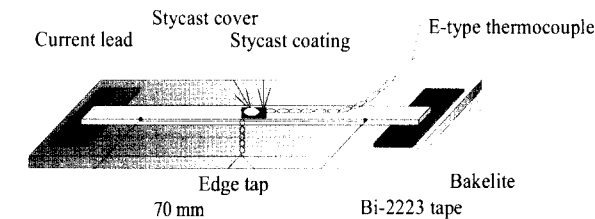
Fig. 1. Matrix material's resistivity vs. temperature characteristics.

\* 정 회 원 : 전남대 공대 전기공학과 조교수  
 \*\* 정 회 원 : 서라벌대 전기전자전산학부 조교수  
 \*\*\* 정 회 원 : 순천향대 공대 정보기술공학부 교수  
 원고접수 : 2001년 04월 26일  
 심사완료 : 2001년 05월 23일

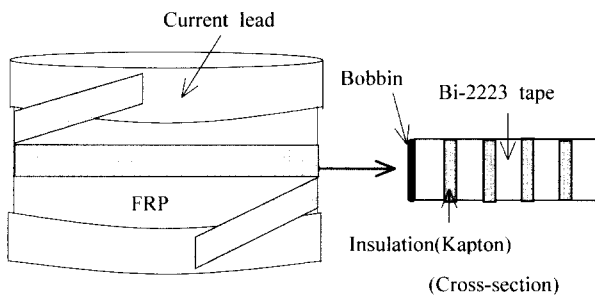
그림 2 a)는 전력케이블의 구조를 모의한 직선형 샘플을 나타낸다. 직선형 샘플은 43 mm(폭)×160 mm(길이)×3 mm(두께)인 베크라이트판 위에 표 1의 Bi-2223 테이프를 일직선상으로 배치하고, 양단에 설치한 전류리드와 납땜한 구조로 하였다. 또한 그림 2 a)와 동일한 샘플에 0.05 mm(두께) × 10 mm(폭)의 Kapton 테이프를 절연하여 전력케이블에서 Bi-2223 테이프가 경험하게 되는 상황과 유사한 구조를 갖는 절연된 직선형 샘플을 제작하였다.

그림 2 b)는 표 1의 Bi-2223 테이프를 사용하여 변압기의 구조를 모의한 팬케이크형 샘플을 나타낸다. Bi-2223 테이프의 절연방식은 변압기의 권선구조에서 일반적으로 채택되고 있는 도체절연방식과 층간절연방식으로 채택하였고, 절연재료는 그림 2 a)와 동일한 Kapton 테이프를 사용하였다. 변압기 권선구조를 모의한 팬케이크형 샘플은 88 mm(직경) × 60 mm(높이)인 원통형 FRP 보빈의 상단과 하단에 각각 부착한 폭 20 mm의 원통형 전류리드에 Bi-2223 테이프를 납땜한 구조이다.

사고전류에 대한 Bi-2223 테이프의 온도는 팬케이크형 샘플에서 내부로부터 3번째 층의 테이프에 설치한 열전대로 측정하였으며, Bi-2223 테이프의 저항은 동일한 층에 납땜하여 부착한 전압 탭 사이의 길이가 70 mm인 edge 탭을 사용하여 측정하였다. 또한 Bi-2223 테이프 길이 방향으로의 임계전류 불균일도를 조사하기 위하여 Bi-2223 테이프의 총 길이가 약 1.4 m인 팬케이크형 샘플 양단에 부착한 제2의 전압 탭을 이용하여 임계전류를 측정하였다. 그 결과, 약 1.4 m의 전압 탭 사이에서 측정된 임계전류와 70 mm의 전압 탭 사이에서 측정된 임계전류는 거의 동일한 것을 확인하였다.



a) 직선형 샘플  
a) straight sample



b) 팬케이크형 샘플  
b) pancake sample

그림 2. 샘플 개략도.  
Fig. 2. Schematic of the samples.

## 2.2 실험 방법

그림 3은 실험장치의 개략도를 나타낸다. 그림 3에서 사고전류를 공급하기 위한 전원은 300A(20 V, DC ~1 kHz), 자석상수가 25 mT/A인 외부자석용 전원은 30 A(50 V, DC~1 kHz)이다. 2채널 함수발생기를 이용하여 실험샘플에 흐르는 전류위상을 자체 제작한 자속코일을 사용하여 외부자장의 위상을 검출함으로써 외부로부터 인가되는 자장의 위상과 동일하게 하였다. 외부자석으로부터 인가되는 자장의 세기 및 실험 샘플에 흐르는 전류는 션트를 사용하여 측정하였다.

퀀치로 인하여 발생하는 저항 성장을 측정하기 위한 전압 탭은 양단의 유도전압이 작아서 별도의 상쇄코일이 불필요한 edge 탭을 사용하였다(길이는 70 mm로 동일)[2], [3]. 특히 교류 저항은 Bi-2223 테이프에 정현파 전류를 흘려 측정된 왜형파 전압을 FFT(Fast Fourier Transform)로 분석하여 전류와 동상인 기본파 전압 진폭을 전류 진폭으로 나누어 산출하였다.

Bi-2223 테이프의 온도측정을 위해 설치한 열전대와 전기적인 접촉에 의한 저항성 전압 노이즈를 방지하기 위하여, 열전도 특성이 우수한 저온 에폭시 수지(stycast)를 수  $\mu\text{m}$  두께로 코팅하여 열전대와 Bi-2223 테이프를 전기적으로 절연시켰다. 또한 Bi-2223 테이프와 열전대를 기계적으로 단단하게 접촉시키기 위하여 열전대를 저온 에폭시로 도포하였다. 사고전류에 대한 Bi-2223 테이프의 온도는 직경 0.13 mm인 E형 열전대를 이용하여 감지한 신호를 디지털스코프의 온도 모듈을 통해 측정하였다. 특히 액체질소온도 부근에서의 수 K의 온도 상승을 정밀하게 조사하기 위하여 다이오드형 온도센서인 DT - 470으로 열전대를 교정하여 사용하였다.

## 3. 실험 결과 및 검토

### 3.1 직선형 샘플의 사고전류 특성

#### 3.1.1. 외부자장의 영향

전력케이블 및 변압기 등에 이용되는 Bi-2223 테이프는 외부자장을 경험하게 되고, 이와 같은 외부자장은 Bi-2223 테이프의 임계전류를 감소시키는 결과를 초래한다. 이러한 점을 고려하여 외부자장이 Bi-2223 테이프의 사고전류 특성에 미치는 영향에 대하여 조사하였다.

그림 3의 외부자석을 이용하여 비절연 Bi-2223/Ag 테이프 면에 수직인 직·교류 자장을 인가한 상태에서 정상상태의 직류전류를 흘렸을 경우 테이프의 온도 및

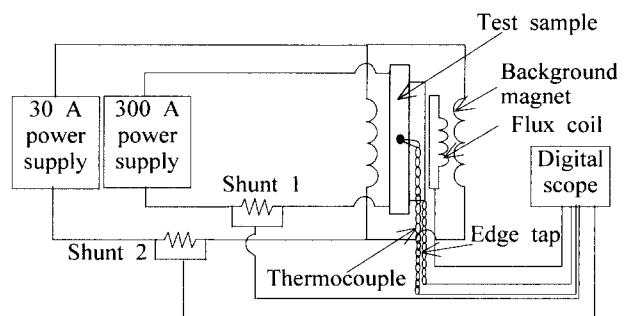


그림 3. 실험장치 개략도.  
Fig. 3. Schematic of the experimental set-up.

저항특성을 그림 4에 나타내었다. 동 그림에서 실선은 77 K에서의 Ag 저항률(그림 1로부터 약  $2.7 \text{ n}\Omega \cdot \text{m}$ )과 표 1의 Bi-2223/Ag 테이프 사양으로부터 구한 저항 계산치를 나타낸다. 그림 4로부터 Bi-2223/Ag 테이프의 온도는 임계전류보다 대단히 큰 과임계전류 영역에서도 초기온도인 77 K로 유지되는 특성을 나타냄을 알 수 있다. 또한, 이와 같이 테이프의 온도변화가 없는 경우에 있어서 테이프의 저항은 과임계전류가 증가함에 따라 급격히 증가하여 계산 저항값으로 포화되는 특성을 볼 수 있다. 특히 Bi-2223 테이프의 저항은 외부자장이 증가하여 임계전류가 작아질수록 보다 큰 과임계전류에서 포화되는 경향을 나타낸다. 이와 같은 포화특성은 임계전류(20 A)의 약 10배 정도의 큰 과임계전류에서 발생하였다. 그리고 임계전류의 크기가 같기만 하면 외부자장의 직·교류에는 무관한 특성을 나타낸다. 따라서, 실제 시스템의 응용에서 중요한 사고전류와 같이 큰 과임계전류 영역에서 Bi-2223 테이프의 저항특성은 임계전류의 크기에 무관함을 알 수 있다.

**3.1.2. 주파수의 영향**

Bi-2223 테이프가 큰 사고전류에 의해 상전도 상태로 전이될 경우, 테이프 저항은 모재의 저항 값에 의해 결정되며, 또한 모재의 저항률은 77 K의 극저온 환경에서 상온의 경우보다 약 10분의 1정도로 작아져 테이프에 흐르는 전류 주파수에 의한 표피효과의 영향이 나타날 수 있다. 이러한 점에 착안하여 주파수가 Bi-2223 테이프의 사고전류 특성에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 그림 5에는 비절연 Bi-2223/Ag 테이프에 흐르는 정상상태 전류의 주파수를 DC~360 Hz 까지 변화시켰을 경우에 있어서 테이프의 저항 및 온도특성을 나타낸다. 동 그림에서  $I_{c0}$ 는 외부자장을 인가하지 않은 상태에서의 임계전류를 나타낸다.

그림 5에서, 비절연 Bi-2223/Ag 테이프의 온도는 주파수에 무관하게 77 K로 일정하게 유지되며, 저항 특성도 그림 4의 결과와 유사하게 과임계전류가 증가함에 따라서 일정한 값으로 포화되는 경향을 보인다. 또한 과임계전류가 비교적 작은영역에서는 주파수의 증가에 따라 표피효과의 영향이 다소 나타나지만, 실제

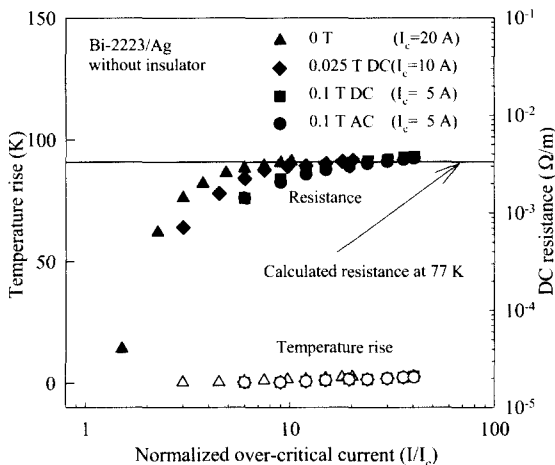


그림 4. 비절연 직선형 샘플의 온도상승·저항 - 과임계전류 관계.  
 Fig. 4. Temperature rise and resistance vs. normalized over-critical current in the non-insulated straight sample.

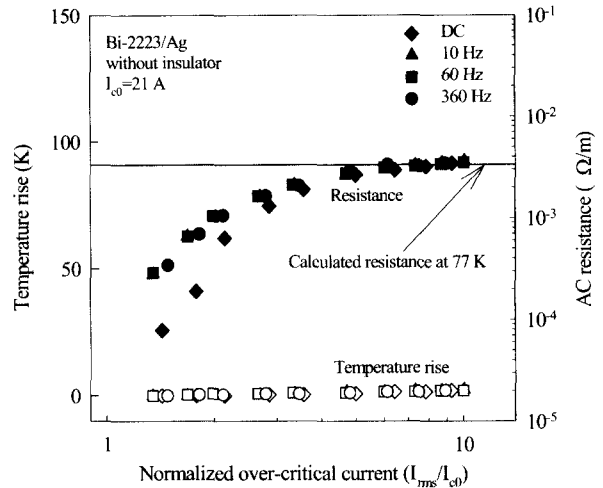


그림 5. 비절연 직선형 샘플의 온도상승·저항 - 과임계전류 관계.  
 Fig. 5. Temperature rise and resistance vs. normalized over-critical current in the non-insulated straight sample.

응용에서 중요한 큰 과임계전류 영역에서 테이프의 저항은 주파수에도 무관한 특성을 나타낸다. 따라서, 사고전류와 같이 큰 과임계전류 영역에서 Bi-2223 테이프는 상전도 도체에서 일반적으로 나타나는 표피효과의 영향을 무시할 수 있음을 알 수 있다.

**3.1.3. 전기절연의 영향**

Bi-2223 테이프를 전력케이블에서 사용하는 경우, Bi-2223 테이프의 양면은 절연물 및 구조재(former)에 의해 액체질소와 직접적으로 접촉하지 못하는 구조적 특징을 고려하여 전기절연이 Bi-2223 테이프의 사고전류 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 그림 2 a)의 직선형 샘플에 전압단자간 거리 70 mm는 같게 하고 절연부분의 길이만 35~100 mm로 달리하여, 60 Hz의 정상상태 교류전류를 흘렸을 때 테이프의 저항과 온도 특성을 그림 6에 나타내었다.

그림 6의 결과로부터, 절연 Bi-2223/Ag 테이프의 온도는 큰 과임계전류 영역에서 급격히 증가하며, 그림 4 및 그림 5의 비절연 샘플과는 상이한 사고전류 특성을 나타낸다. 그리고 절연길이가 전압 탭 사이의 길이인 70 mm보다 짧은 경우는 절연길이에 따른 영향이 큰 반면, 70 mm보다 긴 경우에는 그 영향이 적어 거의 동일한 온도특성을 보인다. 또한 절연 Bi-2223/Ag 테이프의 저항특성도 비절연 샘플의 특성과 상이한 경향을 나타내며, 77 K에서의 Ag 저항률로부터 계산된 저항 값에 포화되지 않고, 과임계전류가 증가함에 따라서 계속하여 증가하는 것을 볼 수 있다. 그리고 Bi-2223 테이프의 저항은 동일한 과임계전류라고 할지라도 온도상승이 큰 경우가 작은 경우보다 많이 증가하며, 이는 테이프의 온도상승에 따른 Ag 저항률의 증가에 기인하는 것으로 사료된다.

그림 7은 절연 Bi-2223/Ag 테이프의 저항특성에 미치는 온도의 영향을 정량적으로 검토하기 위하여 조사한 실험결과로서, 절연길이가 100 mm인 직선형 샘플에 정상상태 직류전류를 흘렸을 때 저항 및 온도 특성을 나타낸다. 그림 7에서 가늘실선과 굵은실선은 77 K에서의 Ag 저항률 즉  $2.7 \text{ n}\Omega \cdot \text{m}$ , 각각의 과임계전류에 대하여 측정된 테이프 온도, 그림 1의 Ag의

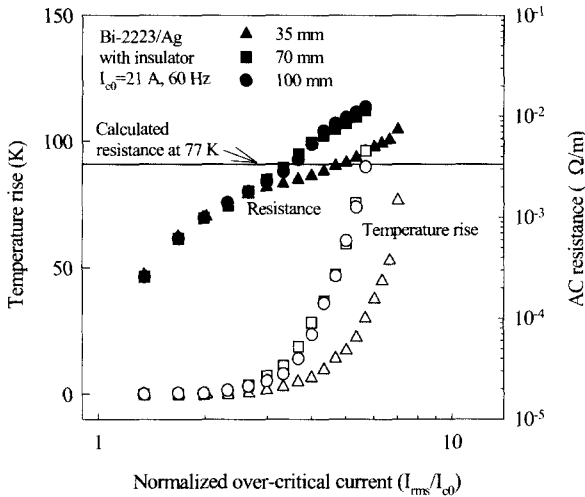


그림 6. 절연 직선형 샘플의 온도상승·저항 - 과임계전류 관계.

Fig. 6. Temperature rise and resistance vs. normalized over-critical current in the insulated straight sample.

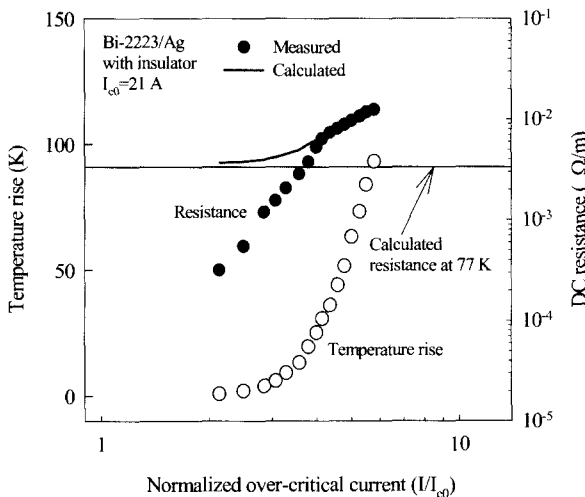


그림 7. 절연 직선형 샘플의 온도상승·저항 - 과임계전류 관계.

Fig. 7. Temperature rise and resistance vs. normalized over-critical current in the insulated straight sample.

저항률 - 온도 특성 및 표 1의 Bi-2223/Ag 테이프 사양으로부터 계산된 저항을 각각 나타낸다.

그림 7의 결과로부터, 과임계전류가 작아 온도상승이 작은 영역에서 측정된 저항은 계산저항과 차이를 보이고 있으나, 테이프의 온도가 Bi-2223의 임계온도 즉 110 K보다 커지는 영역에서는 이들 두 값이 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

### 3.1.4. 모재의 영향

절연 길이가 100 mm이며 모재의 재질이 상이한 절연 Bi-2223테이프에 60 Hz의 정상상태 교류전류를 흘렸을 때 테이프의 온도 및 저항 특성을 그림 8에 나타낸다.

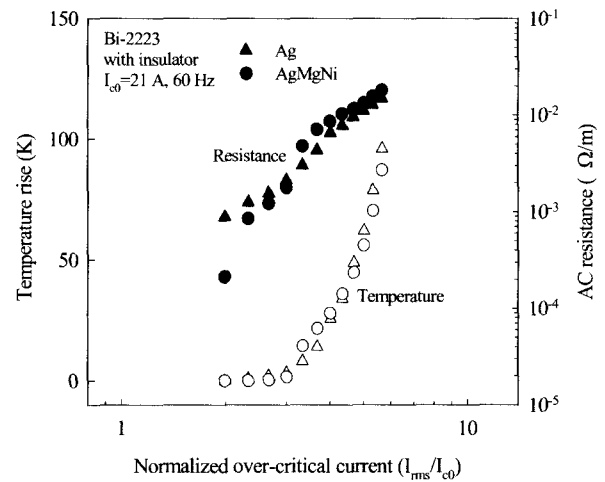


그림 8. 절연 직선형 샘플의 온도상승·저항 - 과임계전류 관계.

Fig. 8. Temperature rise and resistance vs. normalized over-critical current in the insulated straight sample.

그림 8의 결과로부터, 모재가 상이한 Bi-2223 테이프의 온도특성이 유사하며, 그림 1에서 보는 바와 같이 AgMgNi 합금의 저항률이 순수 Ag의 저항률보다 대단히 큼에도 불구하고 테이프의 저항특성도 온도특성과 마찬가지로 서로 유사함을 알 수 있다. 이는 제작사로부터 제공된 표 1에 나타난 사양의 부정확성에 기인하는 것으로 사료된다.

### 3.1.5. 사고 지속시간의 영향

전력용용 장치에서는 사고전류가 일반적으로 수 사이클 동안 흐르는 대단히 과도적인 현상이다. 하지만 전력계통의 사고 시 사고전류를 끊어주는 차단기의 불안정한 운전 등을 감안하여 사고 지속시간이 Bi-2223 테이프의 사고전류 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 그림 9는 절연길이가 100 mm인 절연 Bi-2223/Ag 테이프에 60 Hz의 과도상태 전류의 지속시간을 5~100 사이클까지 변화시켰을 때 테이프의 저항과 온도 특성을 나타낸다.

그림 9의 결과로부터, 사고전류의 지속시간이 수 사이클인 경우는 절연 Bi-2223/Ag 테이프의 온도상승이 일어나지 않아 단선으로부터 안전함을 알 수 있다. 그러나 지속시간이 증가함에 따라서 절연Bi-2223/Ag 테이프의 온도가 급격히 증가한다. 절연 Bi-2223/Ag 테이프에서 저항은 테이프의 온도가 상승하지 않은 경우는 과임계전류가 증가하여도 77 K에서의 Ag 저항률로부터 계산된 저항 값에 포화되는 반면, 사고 지속시간이 길어져서 테이프의 온도가 상승하는 경우는 이의 영향 때문에 테이프의 저항도 증가하는 것을 나타낸다.

### 3.2 팬케이크형 샘플의 사고전류 특성

도체절연 팬케이크형 샘플에 과도상태 교류전류를 흘렸을 때 테이프의 저항 및 온도특성을 그림 10에 나타낸다.

그림 10의 결과로부터, 수 사이클의 사고전류에 대한 도체절연 팬케이크형 샘플의 온도상승은 거의 없어 테이프는 단선으로부터 안전한 반면, 사고 지속시간이

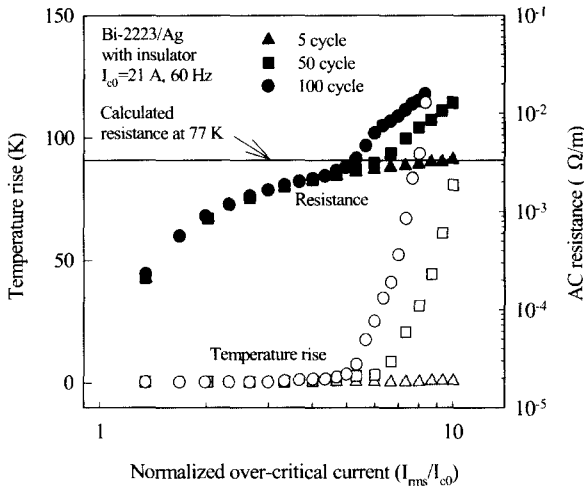


그림 9. 절연 직선형 샘플의 온도상승·저항 - 과임계전류 관계.

Fig. 9. Temperature rise and resistance vs. normalized over-critical current in the insulated straight sample.

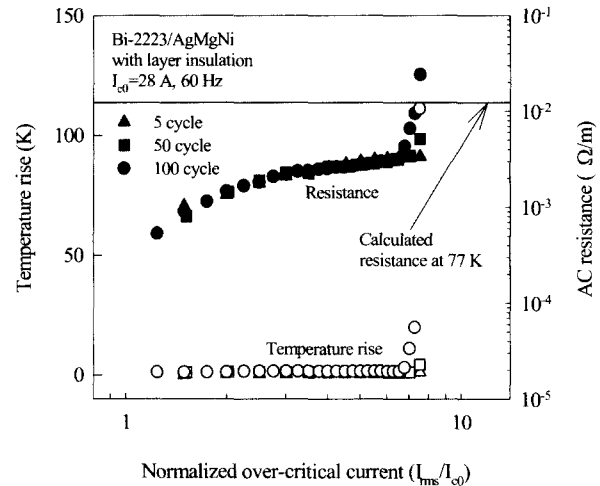


그림 11. 층간 절연 팬케이크형 샘플의 온도 상승·저항 - 과임계전류 관계.

Fig. 11. Temperature rise and resistance vs. normalized over-critical current in the pancake sample with a layer insulation.

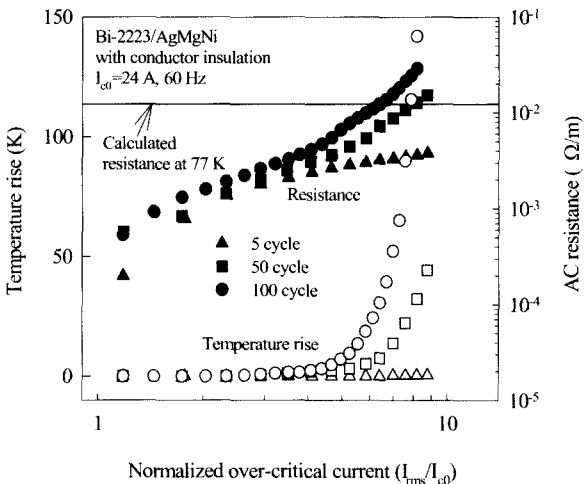


그림 10. 도체 절연 팬케이크형 샘플의 온도 상승·저항 - 과임계전류 관계.

Fig. 10. Temperature rise and resistance vs. normalized over-critical current in the pancake sample with a conductor insulation.

길어질수록 온도는 급격히 상승하는 경향을 나타내고 있고, 이는 도체절연 방식의 고유한 냉각특성과 직접 관련이 있음을 암시한다. 또한 저항특성도 온도특성과 마찬가지로 사고 지속시간이 길어질수록 급격히 증가하는 경향을 보인다.

층간 절연 팬케이크형 샘플에 대한 테이프의 저항 및 온도특성을 그림 11에 나타낸다.

그림 11의 결과로부터, 층간절연 팬케이크형 샘플도 도체절연샘플과 마찬가지로 수 사이클의 사고전류에 대해서는 온도상승이 없어 테이프는 단선으로부터 안전함을 알 수 있다. 특히 그림 9의 절연 직선형샘플과 그림 10의 도체절연 팬케이크형샘플에 대한 실험결과와 비교하여 이들의 저항과 온도보다는 층간절연샘플에서의 테이프의 저항 및 온도가 작은 것을 나타낸다.

따라서, 팬케이크형 샘플 중에서는 층간절연방식이 도체절연방식보다 사고전류에 대해서는 더욱 안전하다고 할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 Bi-2223 테이프의 전력응용에 앞서 반드시 선행되어야 하는 사고전류특성에 미치는 전기 절연방식, 사고지속시간, 외부자장, 주파수 및 모재 등의 영향에 대하여 실험적으로 조사하였으며, 주요연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 사고전류 특성은 테이프의 절연방식 및 사고지속 시간에는 크게 영향을 받는 반면 외부자장, 주파수에는 거의 영향을 받지 않는다.
- 2) 전력케이블의 구조를 모의한 절연 직선형 샘플과 변압기구조를 모의한 도체절연 팬케이크형 샘플의 사고전류 특성은 유사하였다. 이는 Bi-2223 테이프를 절연하는 방식이 서로 유사하기 때문으로 사료된다.
- 3) 팬케이크형 샘플 중에서도 층간절연방식이 도체절연방식보다 사고전류특성이 우수하였다. 이는 층간절연방식의 냉각특성이 도체절연방식보다 우수한 결과에 기인하는 것으로 사료된다.
- 4) Bi-2223 테이프의 온도가 임계온도(110 K)보다 높아지거나 또는 충분히 큰 과임계전류에 의해 완전히 상전도 상태로 전이가 일어나면 모재의 저항률 - 온도 관계로부터 계산된 저항과 측정치는 잘 일치한다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원으로 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

- [1] Y.Iwasa, E.J. McNiff, R.H. Bellis and K. Sato, "Magnetoresistivity of silver over temperature range 4.2 - 159 K," Cryogenics, vol.33, pp. 836-837, 1993.
- [2] 박권배, 이성수, 류경우, 이지광, 차귀수, "Bi-2223 테이프의 과임계전류 특성," 2000년도 한국초전도·저온공학회학술대회논문집, pp. 128-129, 2000.
- [3] 이성수, 박권배, 류경우, 차귀수, "Bi-2223 테이프의 사고전류 특성," 2000년도 대한전기학회하계학술대회논문집, pp. 804-805, 2000.

### 저 자 소 개



#### 류경우(柳炅佑)

1962년 2월 10일생, 1983년 인하대 전기공학과 졸업, 1985년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1995년 일본 Yokohama National Univ. 전자정보공학과 졸업(공학박사), 1986년~1995년 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀 선임연구원, 1996년~현재 전남대학교 전기공학과 조교수



#### 최명주(崔炳柱)

1958년 12월 12일생, 1981년 영남대 전기공학과 졸업, 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1996년 일본 Kyushu University 공학연구과 졸업(공학박사), 1983년~1986년 현대중전기연구소 연구원, 1986년~1996년 한국전기연구소 전력기기연구부, 초전도응용연구사업팀 선임연구원, 1997년~현재 서라벌대학 전기전자전산학부 조교수



#### 차귀수(車貴守)

1956년 7월 18일생, 1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업, 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 순천향대학교 전기공학과 교수